

球形孔泡沫铝合金三明治梁的三点弯曲变形*

张 林 何德坪
(东南大学)

摘 要 研究了球形孔泡沫铝合金的单轴压缩性能,得到了抗压强度与相对密度的关系;与多边形孔泡沫铝合金和泡沫纯铝作了对比,发现球形孔使力学性能有了较大的提高.根据球形孔泡沫铝合金三明治梁三点弯曲的载荷(P)-位移(δ)曲线研究了四种常见破坏模式并建立了破坏模式图.用极限载荷公式得到的计算值与极限载荷的实验值吻合良好.球形孔泡沫铝合金力学性能高于多边形孔泡沫铝合金及泡沫纯铝,因而其三明治梁的力学性能最好.

关键词 金属材料,球形孔泡沫铝合金,泡沫铝合金,三明治梁,三点弯曲

分类号 TG146

文章编号 1005-3093(2005)04-0361-08

Deformation of sandwich beams with spherical pore Al alloy foam core in three-point bending

ZHANG Lin HE Deping**

(Department of Materials Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096)

* Supported by National Key Basic Research and Development Program No.2006CB01200, and National Natural Science Foundation of China No.50231010, No.50471031 and No.50081002. Manuscript received January 11, 2005; in revised form March 23, 2005.

** To whom correspondence should be addressed, Tel:(025)83794119, E-mail:dphe@seu.edu.cn

ABSTRACT The uniform axis compression capability of spherical pore Al alloy foam was studied and the relationship between compression strength and relative density was acquired. A comparison was made among the spherical pore Al alloy foam, polygonal pore Al alloy foam and Al foam. It is concluded that the spherical pore Al alloy foam has more good mechanics property than others two spherical pore. The load-deflection curve of sandwich beams with spherical pore Al alloy foam core loaded in three-point bending and the four kinds of failure mode were investigated and the failure map of sandwich beams was founded. The calculated values with peak load formulae coincide well with the experimental ones. It is concluded that the sandwich beams with core of spherical pore Al alloy foam is excellent for more good mechanics property.

KEY WORDS metallic materials, spherical pore Al alloy foam, foamed Al alloy, sandwich beams, three-point bending

20世纪50~80年代航天领域的发展,使蜂窝铝三明治结构获得了重要应用.与蜂窝铝三明治

* 国家重点基础研究发展计划 2006CB601200、国家自然科学基金 50231010, 50471031 和 50081002 资助项目.
2005年1月11日收到初稿;2005年3月23日收到修改稿.

本文联系人:何德坪,教授,南京市210096,东南大学材料科学与工程系

相比, 泡沫铝三明治具有更好的胶结性能、各向同性、成本低及可以制成复杂形状的零件等优点, 还可钻孔、预埋紧固件以便于连接, 在航天、航空领域有广泛的应用前景, 因而成为各国竞相研究的前沿热点课题^[1,2]. 剑桥大学, 哈佛大学, MIT 等在这一领域的研究以性能设计为主^[3,4], 多以日本研制的泡沫纯铝为芯部材料, 研究了三点弯曲条件下泡沫铝三明治梁的失效^[5,6]. 作者所在的实验室研究了泡沫纯铝层合梁的三点弯曲变形^[7]、高孔隙率、高比强多边形孔泡沫铝合金^[8~10]及其三明治的设计及性能^[11]. 为适应更高强度的需求, 又研制了球形孔泡沫铝合金^[12,13]. 本文在前期工作的基础上, 研究球形孔泡沫铝合金三明治梁的三点弯曲变形.

1 实验方法

在铝合金熔体泡沫生长及其凝固过程中, 保证在泡沫自由生长阶段前期凝固, 以获得球形孔泡沫铝合金^[12,13].

球形孔泡沫铝合金三明治梁的面板材料采用 LY12 铝合金板, 其屈服强度 σ_{yf} 为 270 MPa, 弹性模量 E_f 为 69 GPa, 密度 ρ 为 2.78 g/cm³, 厚度为 0.5、1、1.5、2、3 和 4 mm 等规格. 将实验用铝合金板线切割成一定尺寸的三明治面板备用, 尺寸精度为 0.1 mm.

选取适当孔隙率的球形孔泡沫铝合金, 线切割成所需尺寸, 尺寸精确到 0.1 mm, 用作三明治梁芯部材料. 粘接前将芯部材料用煤油清洗后再用超声波清洗, 烘干备用. 去掉粘接面上的氧化膜并提高粗糙度, 以提高粘接性能, 在一定压力下使粘接.

球形孔泡沫铝合金三明治梁的宽度为 b , 夹芯厚度为 c , 跨距为 L , 面板厚度为 t , 外伸距离为 H . 考虑到实验的合理性和简便性, 取 $b=c$, $H/L=0.1$. 根据实验要求选取有代表性的 c/L 及 t/L , 即可确定试样的总长 l , 宽度 b 及面板厚度 t , 其他相关尺寸即随之确定. 最小尺寸不小于五个平均孔径, 具体选定尺寸见表 1.

将制作好的三明治梁在 CSS-2202 电子万能试验机上进行三点弯曲实验, 万能试验机的位移误差为 1%. 用高强度钢块作为加载压头, 其宽度 a 记为 0.1 L . 计算机自动控制加载过程, 加载速

表 1 球形孔泡沫铝合金三明治梁尺寸及极限载荷

Table 1 Sizes and average density of sandwich beams with spherical pore Al alloy foam

No.	c /mm	l /mm	t /mm	Average density /g·cm ⁻³	Calculated peak loads and failure modes/kN	Experimental peak load sand failure modes/kN	Error between calculated and experimental/%
1	25	90	2	1.09	12.65In	12.77In	0.9
2	15	120	4	1.48	9.81Cyb	10.23Cyb	4.3
3	25	100	4	1.29	21.22In	22.58In	6.4
4	25	100	3	1.20	16.93In	17.85In	5.4
5	12	80	4	1.58	7.17Cya	8.36Cya	16.6
6	15	80	3	1.37	9.47Cyb	9.98Cyb	5.4
7	20	80	5	1.46	19.70Cya	21.32Cya	8.2
8	15	120	3	1.37	7.29Fyl	8.39Fyl	15.1
9	11	80	3	1.49	5.45Cyb	6.12Cyb	12.3
10	18	96	4	1.41	14.26Cyb	15.37Cyb	7.8
11	25	120	3	1.20	16.93In	17.88In	5.6

率 2 mm/min, 并实时采集压力和位移的数据, 绘制出载荷 ($P-N$) - 位移 (δ -mm) 曲线, 由此可以得到相应的刚度和比刚度, 与泡沫纯铝及多边形孔泡沫铝合金三明治梁作了比较. 用数码摄像机记录三点弯曲试验的全过程, 以显示三明治梁的破坏情况. 测定卸载刚度的方法: 当载荷上升到预定平台应力的约三分之一处, 卸去载荷后再重新加载, 卸载速度为 1.5 mm/min. 为了保证实验的可重复性, 本文对每种尺寸的试样进行 5 组实验.

2 结果与讨论

2.1 球形孔泡沫铝合金的基本性能

球形孔泡沫铝合金的平均孔径 $d=0.5\sim 1.5$ mm、孔形状为球形、孔洞分布均匀, 孔隙率 $(70\pm 1)\%$ 、密度 $\rho=0.84$ g/cm³、相对密度 $\rho/\rho^*=0.3$, 其中 ρ 为泡沫铝和泡沫铝合金的密度, ρ^* 为基体铝和铝合金的密度. 泡沫铝合金的力学性能 (刚度和强度) 和相对密度的幂指数成比例关系^[14,15], 屈服强度为

$$\sigma_c = A\sigma_s \times \left[0.5 \times \left(\frac{\rho}{\rho^*} \right)^{\frac{3}{2}} + 0.3 \times \left(\frac{\rho}{\rho^*} \right) \right] \quad (1)$$

其中 A 为泡沫铝合金的强度系数, σ_s 为基体铝合金的屈服强度, 数值为 270 MPa. 对于不同相对密度的泡沫铝合金, 球形孔泡沫铝合金的 A 约为 0.585.

球形孔泡沫铝合金与多边形孔泡沫铝合金和泡沫纯铝的性能比较列于表 2 (表中有关多边形孔泡沫铝合金和高孔隙率泡沫纯铝的相关数据分别来自文献 [7,11], 下同), 表中孔隙率 $P_r=100 \times (1 - \rho/\rho^*)(\%)$.

表 2 三种泡沫 Al 及泡沫 Al 合金的性能比较

Table 2 Comparison of properties of three kinds of Al foam and Al alloy foam

Kind of foam	Pore structure	d /mm	P_r /%	ρ /g·cm ⁻³	Compression strength /MPa	Shear strength /MPa	Elastics modules /GPa	Shear modules /GPa
Spherical pore								
Al alloy foam	Spherical pore	0.5~1.5	70±1	0.84	27	17	3.2	1.20
Polygonal pore								
Al alloy foam	Polygonal pore	2~4	90±1	0.28	8	5	1.2	0.45
Al foam	Polygonal pore	2~5	85±1	0.41	2.5	1.6	1.0	0.35

由图 1 可见, 两种泡沫铝合金的孔结构分别为球形和多边形. 图 2 表明, 在本文研究的相对密度范围内 ($\rho/\rho^*=0.3\sim 0.35$, $P_r=65\%\sim 70\%$), 球形孔泡沫铝合金的屈服强度可以用式 (1) 很好地拟合.

与多边形孔泡沫铝合金和泡沫纯铝比较, 球形孔泡沫铝合金的基体材料分别增加了一倍和两倍, 其力学性能有较大的提高. 球形孔泡沫铝合金的抗压强度和抗剪强度是多边形孔泡沫铝合金的 3.4 倍, 是泡沫纯铝的 10.8 倍 (表 2).

2.2 球形孔泡沫铝合金三明治梁三点弯曲的 $P-\delta$ 曲线

泡沫铝合金三明治梁典型的 $P-\delta$ 曲线可分为三个阶段 (图 3):

(1) 线弹性段, 图中 1 区. 在该阶段三明治梁发生线弹性弯曲变形, 卸载后变形可恢复.

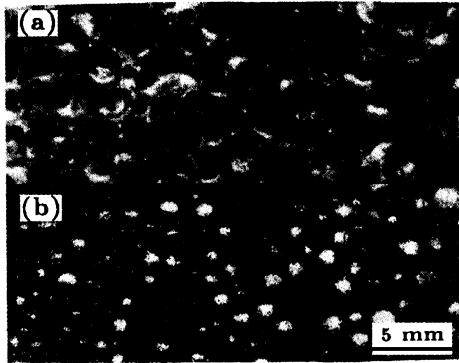


图 1 两种铝合金泡沫的孔结构

Fig.1 The two pore structure of Al alloy foam
(a) polygonal pore Al alloy foam; (b) spherical pore Al alloy foam

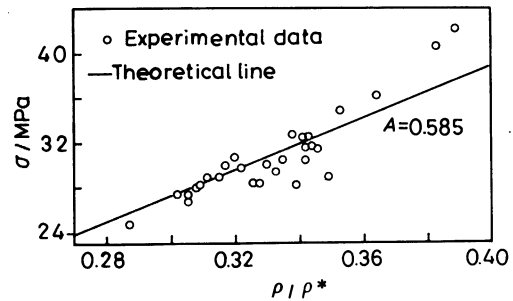


图 2 球形孔泡沫铝合金抗压强度与相对密度的关系

Fig.2 Relationship between compression strength and relative density of Al alloy foam with spherical pore

(2) 弹塑性段, 图中 2 区. 进一步增加载荷, 面板或者夹芯内部的一些部分达到屈服应力, 三明治梁发生塑性变形. 随着变形的增加, 载荷增加缓慢. (3) 失稳段, 图中 3 区. 在弹塑性段后, 随着变形的增加载荷增加越来越缓慢, 达到极限值 P_1 后, 三明治梁的内部应力较大处形成裂纹, 三明治梁承载能力随即迅速下降.

图 4 表明, 球形孔泡沫铝合金三明治梁的承载能力明显地高于多边形孔泡沫铝合金和泡沫纯铝三明治梁. 在压头的下面, 球形孔和多边形孔泡沫材料受压缩和剪切综合作用, 在加载中很快达到塑性, 形成局部的接触塑性区, 导致部分泡沫破裂, 从而使核心的抗剪能力下降, 整个三明治梁随即达到破坏极限 (图 4 曲线 A, B). 相比之下脆性较弱的泡沫纯铝其三明治结构弯曲时出

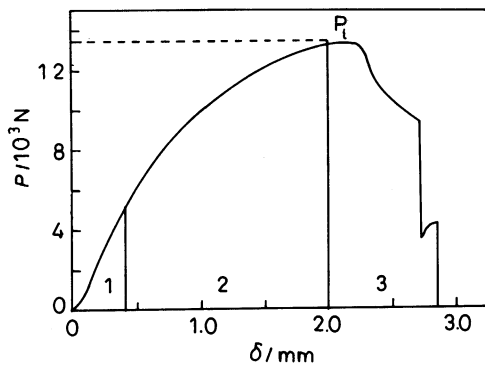


图 3 球形孔泡沫铝合金三明治梁的 $P-\delta$ 曲线
Fig.3 $P-\delta$ curve of sandwich beams with spherical pore Al alloy foam

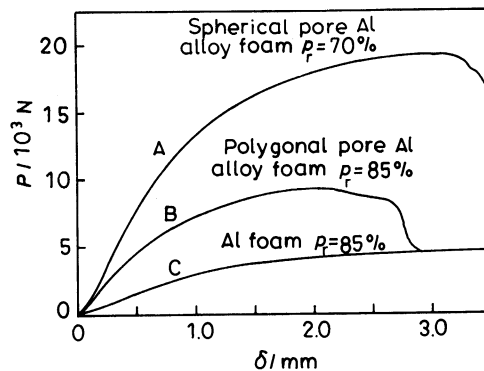


图 4 相同尺寸的三种三明治梁的 $P-\delta$ 曲线
Fig.4 $P-\delta$ curve of three kinds of sandwich beams with same size

现很大的塑性变形之后不立即破坏, 其 $P-\delta$ 曲线有很大的平台区 (图 4 曲线 C)。

计算结果表明, 图 4 中球形孔泡沫铝合金三明治梁比其它两种三明治梁的质量增加了 30%, 其极限载荷分别提高了 1 倍和 4 倍。

2.3 球形孔泡沫铝三明治梁的刚度

可以用 P/δ 描述泡沫铝三明治梁的弯曲刚度^[3]。三明治梁三点弯曲过程中 P 和 δ 关系为

$$\delta = \frac{PL^3}{48(EI)_{\text{eq}}} + \frac{PL}{4(AG)_{\text{eq}}} \quad (2)$$

其中

$$(EI)_{\text{eq}} = \frac{E_f b t (c+t)^2}{2} + \frac{E_f b t^3}{6} + \frac{E_c b c^3}{12} \quad (3)$$

$$(AG)_{\text{eq}} = \frac{G_c b (c+t)^2}{c} \quad (4)$$

式 (2) 中 $\frac{PL^3}{48(EI)_{\text{eq}}}$ 表示纯弯曲引起的位移, $\frac{PL}{4(AG)_{\text{eq}}}$ 表示考虑剪切以后对位移的修正。式 (3) 中 $\frac{E_f b t (c+t)^2}{2}$ 和 $\frac{E_f b t^3}{6}$ 表示面板对刚度的贡献, $\frac{E_c b c^3}{12}$ 表示夹芯对刚度的贡献。式 (4) 中 G_c 表示夹芯的剪切刚度。

$P-\delta$ 曲线起始阶段直线段的斜率表示加载刚度, 卸载曲线斜率表示卸载刚度。实验结果表明, 泡沫铝的加载刚度比卸载刚度低, 其三明治梁的加载刚度也低于卸载刚度。实验得出的加载和卸载刚度 (P/δ) 比计算结果略大, 可能是胶结时渗入球形孔泡沫铝合金表面孔里的高刚度胶结层对刚度有所贡献。分别将泡沫铝的卸载弹性模量代入式 (2) 计算出球形孔泡沫铝合金三明治梁的卸载刚度 P/δ , 并与实验比较, 结果如图 5 所示。

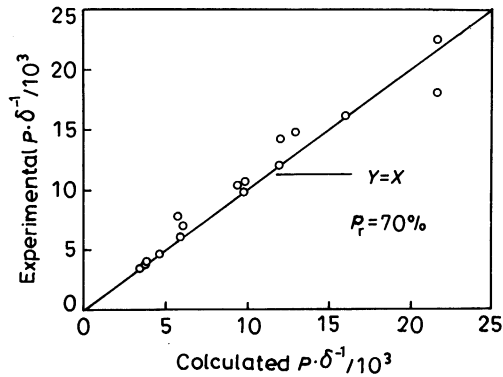


图 5 卸载刚度实验与计算值比较

Fig.5 Comparison of stiffness between experimental and calculated values

表 3 球形孔泡沫铝合金三明治梁与其它两种梁的卸载刚度比较

Table 3 Comparison of unloaded stiffness of sandwich beams with spherical pore Al alloy foam core and other two kind of beams

	Calculated unload stiffness /N·mm ⁻¹	Experimental unload stiffness /N·mm ⁻¹	Error /%
Sandwich beams with spherical pore Al alloy foam core	21638	22658	4.7
Sandwich beams with polygonal pore Al alloy foam core	9826	10696	8.9
Sandwich beams with Al foam core	7864	7847	-0.2

表 3 给出了相同尺寸的球形孔泡沫铝合金三明治梁、多边形孔泡沫铝合金三明治梁和泡沫纯铝三明治梁的卸载刚度的比较。

由于球形孔泡沫铝合金的剪切模量比多边形孔泡沫铝合金和泡沫纯铝提高很多(表 2), 球形孔泡沫铝合金三明治梁的刚度有很大提高。由表 3 可见, 相同尺寸的多边形孔泡沫铝合金三明治梁的计算卸载刚度和实际卸载刚度, 分别是球形孔泡沫铝合金三明治梁的 0.454 倍和 0.493 倍; 高孔隙率泡沫纯铝三明治梁的计算卸载刚度和实际卸载刚度均是球形孔泡沫铝合金三明治梁 0.363 倍。

2.4 球形孔泡沫铝合金三明治梁的比刚度

一般用比刚度 $E^{1/2}/\rho$ 来综合评价梁的抗弯特性^[4]。其中 E 为弯曲弹性模量, ρ 为材料的密度。泡沫铝合金三明治梁的等效弯曲弹性模量:

$$E = \frac{(EI)_{eq}}{I} = \frac{6E_f t c^2}{(c + 2t)^3} \quad (5)$$

其中 ρ 为三明治梁的平均密度。优化的球形孔泡沫铝合金三明治梁(如 $t/L=0.025$, $c/L=0.22$, 对于多边形孔泡沫铝合金和泡沫纯铝取 $\rho/\rho^*=0.15$, 对于球形孔泡沫铝合金取 $\rho/\rho^*=0.3$)的弯曲比刚度 $E^{1/2}/\rho$ 较大, 与其它材料梁的 ρ 和 $E^{1/2}/\rho$ 的比值列于表 3[比刚度单位: $(\text{GPa})^{1/2} \cdot (\text{kg}/\text{m}^3)^{-1}$, 密度单位: kg/m^3]。

由表 4 可见, 与其它传统材料梁相比, 球形孔泡沫铝合金三明治梁具有很高的弯曲比刚度和较低的密度(与水的比重接近); 与多边形孔泡沫铝合金三明治梁相比, 比刚度略有提高; 与泡沫纯铝三明治梁的比刚度差别不大。

表 4 球形孔泡沫铝合金三明治梁与其它材料梁的比刚度和密度的比较

Table 4 Comparison of specific stiffness and density between spherical pore Al alloy foam sandwich beam and other materials

	Sandwich beams with spherical pore Al alloy foam core	Sandwich beams with polygonal pore Al alloy foam core	Sandwich beams with Al foam core	Al and alloy	Steel
$E^{1/2}/\rho$ $/(\text{GPa})^{1/2} \cdot (\text{kg}/\text{m}^3)^{-1}$	28.7×10^{-3}	26.3×10^{-3}	29.2×10^{-3}	3.07×10^{-3}	1.81×10^{-3}
$\rho/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	1.18×10^3	0.73×10^3	0.72×10^3	2.7×10^3	7.8×10^3

2.5 球形孔泡沫铝合金三明治梁三点弯曲破坏的模式图

三明治梁的破坏模式有面板屈服、夹芯剪切 A、夹芯剪切 B、凹陷等几种破坏模式。在确定了面板和夹芯的材料及夹芯的相对密度后, 三明治梁的破坏模式主要与尺寸有关^[3]。本文在极限载荷公式的基础上建立了破坏模式图(表 5)。根据破坏模式图可以估计试样可能的破坏模式。

令表 5 中任意两种破坏模式的极限载荷相等, 则可以产生一条曲线。将 4 种破坏模式两两组

表 5 各种模式的极限破坏载荷计算公式

Table 5 Formulae of peak load of different failure modes

Face-yield	Core-shear A	Core-shear B	Indentation
$P_{lf} = 4 \frac{\sigma_{yf} b t (c+t)}{L}$	$P_{lcA} = \frac{2bt^2}{L} \sigma_{yf} + 2bc\tau_{yc} (1 + \frac{2H}{L})$	$P_{lcB} = \frac{4bt^2}{L} \sigma_{yf} + 2bc\tau_{yc}$	$P_l = 2bt \sqrt{\sigma_{yc} \sigma_{yf}} + ab\sigma_{yc}$

合,可以得到 6 条曲线. 破坏模式图中任意点所代表的极限应力,是各破坏模式计算载荷的最小者,据此可去掉 6 条曲线中多余的部分. 剩下的曲线为不同破坏模式的边界,6 条曲线组成三明治梁的破坏模式图(图 6, 7). 试样尺寸的 t/L 和 c/L 在破坏模式图中所处区域确定了试样的破坏模式,而曲线上的点可以随机产生相邻两个区的任意一种破坏模式.

图 6 中实线和虚线分别表示孔隙率为 85% 的多边形孔泡沫铝合金三明治梁和泡沫纯铝三明治梁的破坏模式图;图 7 中实线和虚线分别表示为孔隙率为 70% 和 75% 的球形孔泡沫铝合金三明治梁的破坏模式图.

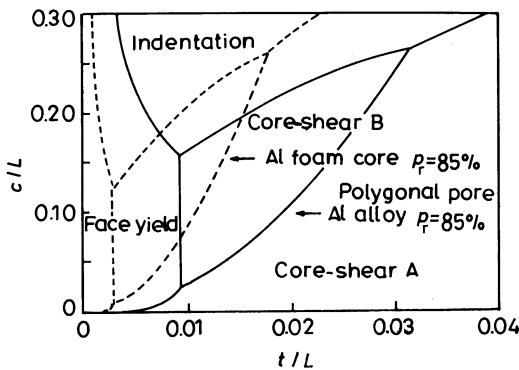


图 6 泡沫纯铝和多边形孔泡沫铝合金三明治梁的破坏模式图

Fig.6 Failure map of sandwich beams with core of Al foam and Al alloy foam of polygonal pore

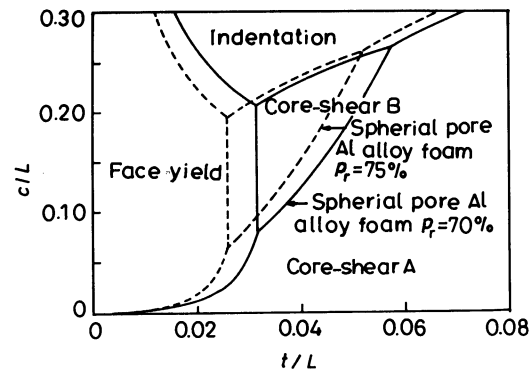


图 7 球形孔泡沫铝合金三明治梁的破坏模式图

Fig.7 Failure map of Al alloy foam sandwich beams with spherical pore

可以看出,每种破坏模式图均由 4 个区域构成,左边区域对应面板破坏 (Face-yield 简称 Fyl); 上面区域代表凹陷破坏 (Indentation 简称 In); 右下区域代表核心剪切 A (Core-shear A 简称 Cya); 中间区域代表核心剪切 B (Core-shear B 简称 Cyb). 构建图 6 和图 7 所需的参数有: 面板材料的屈服强度 $\sigma_{yf}=270$ MPa、梁的外伸长度和梁跨之比 $H/L=0.1$ 、压头宽度和梁跨之比 $a/L=0.1$. 对于不同研究对象,夹芯材料的压缩强度 σ_{yc} 和材料的剪切强度 τ_{yc} 列于表 2.

整个三明治梁是由刚度较大的面板和刚度较小的芯部材料组合成的,两者的刚度相差几十倍. 其中面板主要承受外来的弯矩作用,而核心在理论上主要承受竖向的剪力. 面板的破坏主要就是整个结构的受弯破坏,核心的破坏主要是受剪破坏. 三明治结构的核心是使两种刚度差别较大的材料协同抗弯. 与多边形孔泡沫铝合金和泡沫纯铝比较,球形孔泡沫铝合金具有更好的力学性能,能与面板更好的协同抗弯. 处于面板破坏模式下的三明治结构能够最大限度的利用面板的性能,因而是比较理想的三明治结构. 由图 6 和图 7 可见,当材料的力学性能增强时,破坏模式图整体向右上方移动,面板破坏的区域即 Fyl 区域明显扩大. 由此可见,球形孔泡沫铝合金由于有远优于高孔隙率多边形孔泡沫铝合金及高孔隙率泡沫纯铝的力学性能,其面板破坏的区域即 Fyl 区域明显大于多边形孔泡沫铝合金三明治梁和泡沫纯铝三明治梁的相应区域,因而是更好的三明治芯部材料.

2.6 球形孔泡沫铝合金三明治梁三点弯曲的破坏模式和极限载荷

根据破坏模式图, 选取有代表性的点, 即选定了 c/L 和 t/L . 根据面板的厚度和夹芯的尺寸即可确定试样的总长 l 、宽度 b 、面板厚度 t 以及其他相关尺寸. 所选取的球形孔泡沫铝合金三明治梁相关尺寸见表 1 左边部分; 中间部分为各组尺寸在每种破坏模式下的计算载荷; 表右边部分为理论载荷和实际载荷的比较及误差. 平均密度为铝板和夹芯的总重量除以总体积.

表 1 中三明治梁的芯部材料均采用球形孔泡沫铝合金, 孔隙率 $P_r=(70\pm 1)\%$, 平均孔径 $d=0.5\sim 1.5$ mm. 计算破坏模式与实际破坏模式符合良好; 极限载荷实验值高于计算值, 平均偏差为 8.01%(表 1). 引起极限载荷实验值略高的主要原因可能是胶结时填入球形孔泡沫铝合金表面孔的高强度胶结层对载荷的贡献. 球形孔泡沫铝合金的力学性能主要决定于相对密度, 也受孔结构的影响; 孔隙率不均匀以及球形孔泡沫铝合金内的缺陷, 都可能使极限载荷的实验值偏离理论值.

3 结 论

球形孔泡沫铝合金 ($P_r=70\%$) 具有较低的密度 ($\rho=0.84$ g/cm³), 分别比多边形孔泡沫铝合金和泡沫纯铝增大了两倍和一倍; 而抗压强度和抗剪强度分别是它们的 3.4 倍和 10.8 倍.

球形孔泡沫铝合金三明治梁的加载和卸载刚度 (P/δ)、比刚度 ($E^{1/2}/\rho$) 与计算结果吻合较好; 与其它传统材料梁相比, 具有很高的弯曲比刚度和较低的密度; 极限载荷比其它两种三明治梁提高, 比刚度差别不大. 利用极限载荷公式建立了破坏模式图, 与实际破坏模式符合良好; 与多边形孔泡沫铝合金和泡沫纯铝相比, 破坏模式图整体向右上方移动, 面板破坏模式区域明显扩大.

参 考 文 献

- 1 J.Banhart, M.F.Ashby, N.A.Fleck, Cellular Metals and Metal Foaming Technology (International Conference on Cellular Metals and Metal Foaming, Bremen, German, June 2001)
- 2 J.Banhart, A.Motenson(editors), N.A.Fleck. Metal Foams and Metal Foaming Technology (International Conference on Metal Foams and Metal Foaming Technology, Berlin, Germany 23-25 June 2003)
- 3 L.J.Gibson, M.F.Ashby, *Cellular Solids: Structure and Properties*, Second Edition, Cambridge:(1997)
- 4 M.F.Ashby, A.G.Evans, N.A.Fleck, L.J.Gibson, J.W.Hutchinson, H.N.G.Wadley, *Metal Foams: A Design Guide*, 60, (2000)
- 5 C.Chen, A.M.Harte, N.A.Fleck, *International Journal of Mechanical Sciences*, **43**, 1483(2001)
- 6 T.M.McCormack, R.Miller, O.Kesler, L.J.Gibson, *International Journal of Solids and Structures*, **38**, 4901(2001)
- 7 SHANG Jintang, HE Deping, *Chinese Journal of Materials Research*, **17**(1), 31(2003)
(尚金堂, 何德坪, 材料研究学报, **17**(1), 31(2003))
- 8 ZHEN Mingjun, HE Deping, DAI Ge, *Science in China (ser. B)*, **32**(3), 137(2002)
(郑明军, 何德坪, 戴 戈, 中国科学 (B), **32**(3), 137(2002))
- 9 ZHEN Mingjun, HE Deping, *Chinese Journal of Materials Research*, **16**(5), 473(2002)
(郑明军, 何德坪, 材料研究学报, **16**(5), 473(2002))
- 10 HE Deping, ZHEN Mingjun, *Preparing of Closed-Cell Al Alloy Foam*, 02112600.3, 2004.8.11
(何德坪, 郑明军, 闭孔泡沫铝合金的制备方法, 02112600.3, 2004.8.11)
- 11 ZHAO Long, HE Deping, SHAN Jian, *Chinese Journal of Materials Research*, **18**(5), 578(2004)
(赵 龙, 何德坪, 单 建, 材料研究学报, **18**(5), 578(2004))
- 12 ZOU Yi, HE Deping, JIANG Jiaqiao, *Science in China (ser.B)*, **47**(5), 407(2004)
- 13 HE Deping, ZOU Yi, SHANG Jintang, *Closed-Cell Al Alloy Foam of Low Porosity and Its Preparing Methods*, 200310106496.2, 2003
(何德坪, 邹 毅, 尚金堂, 低孔隙率闭孔泡沫铝合金及其制备方法, 200310106496.2, 2003)
- 14 K.Y.G.McCullough, N.A.Fleck, M.F.Ashby, *Acta Mater.*, **47**(8), 2323(1999)
- 15 E.Andrews, W.Sanders, L.J.Gibson, *Materials Science and Engineering*, **A270**, 113(1999)